

衝撃波の収縮に関する理論的・実験的研究

著者	渡邊 正人
号	1442
発行年	1992
URL	http://hdl.handle.net/10097/6715

氏 名	わた 渡	なべ 邊	まさ 正	と 人
授 与 学 位	博 士 （ 工 学 ）			
学位授与年月日	平成 5 年 3 月 25 日			
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項			
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学専攻			
学 位 論 文 題 目	衝撃波の収縮に関する理論的・実験的研究			
指 導 教 官	東北大学教授 高山 和喜			
論 文 審 査 委 員	東北大学教授	高山 和喜	東北大学教授	大宮司久明
	東北大学教授	嶋 章	東北大学教授	神山 新一
	東北大学助教授	井上 督		

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

円筒状あるいは球状衝撃波に代表される内爆型衝撃波の収縮に関する研究は、1942年Guderleyによる自己相似則を用いた理論解析的研究、また、1951年Perry and Kantrowitzによる液滴型衝撃波管を用いた実験的研究に始まる。衝撃波の収縮では、収縮中心近傍で衝撃波の強さが指数関数的に増大し、同時に、衝撃波面前後の圧力・密度・速度等の物理量の非一様な変動が現れる。また、収縮中心には、極限の超高温・超高压状態を生成する。現在、この極限状態の応用研究が、工学・理学あるいは医学の分野で広く進められている。しかし、衝撃波をとまなう流れは強い非線形性に支配されているため複雑で、収縮する衝撃波について、収縮過程で現れる衝撃波の非線形現象や収縮点での極限状態の生成過程など、理論的にも実験的にも解明されたとは言い難い。

本論文では、まず、収縮する衝撃波現象で見られる衝撃波の非定常現象を、光学可視化計測および数値シミュレーションにより明らかにする。次に、収縮する円筒衝撃波について、実験結果と数値シミュレーション結果の定量比較を行い、収縮にとまなう衝撃波面の歪みの変化から、収縮過程における衝撃波面の安定・不安定性を議論する。さらに、この収縮する円筒衝撃波の安定・不安定性に一般的な見解を与えるため、縦型二重円筒衝撃波管を用いて、任意に与えた擾乱に対する収縮する円筒衝撃波の挙動を、実験的に明らかにする。

第2章 収縮する衝撃波の光学可視化と数値シミュレーション

衝撃波の収縮現象では、収縮過程で現れる衝撃波の非定常現象が、収縮点での物理量の上昇に多大な影響をおよぼす。本章では、まず、円弧凹面からの反射衝撃波の収縮および断面収縮形状を持つ二次元管路での衝撃波の収縮現象について、二重露光ホログラフィー干渉計を用いた光学可視化計測、および、TVD差分法を用いた数値シミュレーションを行い、衝撃波面の非定常現象が収縮点での物理量の変化に与える影響について議論した。これより、半円弧および円弧の一部を反射壁として持つ凹面からの衝撃波の収縮では、平面衝撃波が凹面に入射し、壁面でマッハ反射し、反転マッハ反射を経て正常反射に遷移する過程で生成される第二衝撃波三重点が、収縮点での圧力上昇に寄与し、この結果、凹面壁の初期傾き角が小さいほど収縮点で得られる最高圧が大きいことを明らかにした。また、断面収縮形状を持つ二次元管路では、管路の傾き角に依った反射形態が現れ、準定常的にその反射形態を保ち収縮する。これより、傾き角が小さい時、すなわち、マッハ反射が現れる場合に、衝撃波の収縮速度が上昇し、収縮効率が上がることにより、収縮点での圧力の上昇が大きいことを明らかにした。

次に、水平型二重円筒衝撃波管を用いて生成した円筒衝撃波の収縮過程の可視化計測を行い、収縮・反射する円筒衝撃波の挙動とその背後の流れを実験的に解明した。これより、二重円筒衝撃波管の内側円筒を支える支持柱を通過する際に円筒衝撃波面に与えられた擾乱による衝撃波面の歪みが、収縮にともない増大し、収縮中心近傍で襲撃波面上に衝撃波三重点を生成することを明らかにした。さらに、収縮点での圧力計測を行い、収縮にともなう圧力の時間変化の様子を明らかにした。

また、非球面レンズを用いて、球面での衝撃の反射・収縮の様子を可視化計測し、歪んで収縮する球状衝撃波面上には、反射衝撃波が生成されることを示した。

第3章 収縮する円筒衝撃波の安定性について

収縮する衝撃波の安定・不安定性は、衝撃波力学の未解決の問題の一つで、過去に多くの研究があるが、理論的および実験的にも安定・不安定性について統一した見解は得られていない。特に、理論・数値解析的研究では、収縮する衝撃波の初期擾乱の与え方は、理想的過ぎる場合が少なくない。実験および数値解析の両面から、定量的に収縮する衝撃波現象を解明し、収縮する衝撃波の安定・不安定性を明らかにするには、より現実的な初期擾乱の与え方が重要となる。本章では、前章で示した水平型二重円筒衝撃波管を用いた収縮する円筒衝撃波の実験と同一流路を仮定した三次元数値シミュレーションを行い、収縮する円筒衝撃波の安定・不安定性について議論した。まず、光学可視化で得た干渉計写真、収縮中心近傍での圧力の時間変化および収縮にともなう衝撃波面の歪み分布について、実験結果と比較を行い定量的な一致を得た。特に、干渉計写真との比較では、数値シミュレーションで得られた密度分布に、二重円筒衝撃波管の内側円筒に設置した光学鏡の変形により現れる干渉縞の影響を考慮した結果、流れに無関係な干渉縞の存在を明らかにした。また、収縮にともなう衝撃波面の歪みの成長の様子と、収縮過程に現れる衝撃波三重点の生成過程および伝播の様子を明らかにし、円筒衝撃波の収縮にともない、衝撃波面の変形が、フォンノイマンパラドックスとして表現される連続的な反射から、強い非一様性に対して明確な不連続を持つ衝撃波三重点

へ移行するのと同様に、圧縮波が衝撃波へと成長し、衝撃波面上に衝撃波三重点を形成することを示した。以上の結果より、収縮する円筒衝撃波の安定・不安定性について、収縮する円筒衝撃波は、初期擾乱の成長により衝撃波面の変形が増大し、いわゆる線形不安定の状態になること、さらに、この衝撃波面の変形が大きくなると、衝撃波波面上には衝撃波三重点が形成され、非線形な場での安定な状態へと移行することを明らかにした。

また、二重円筒衝撃波管のもつ 90° 曲がり部の影響を明らかにし、衝撃波面が 90° 曲がり部を通過後、早く平面に移行させるには、管路幅を一定にし、かつ、曲がり部の曲率が緩やかな形状、あるいは、曲がり部での流路幅を絞る形状が効果的であることを明らかにした。

第4章 縦型二重円筒衝撃波管を用いた収縮する円筒衝撃波の生成

これまでの収縮する円筒衝撃波の実験研究では、実験装置や実験条件により必然的に与えられる初期擾乱の存在の下で行われてきた。しかし、収縮する円筒衝撃波の安定・不安定性について一般的な議論を行うには、任意に初期擾乱を付加する場合の収縮現象の観察が必要となる。このために、水平型二重円筒衝撃波管の内側円筒を支える支持柱を取り除き、衝撃波の流路に擾乱の発生源がない構造を持つ縦型二重円筒衝撃波管を製作した。衝撃波管の駆動は、ピストン駆動方式とした。

まず、二重円筒部での圧力波形計測から、衝撃波の生成を確認した。また、縦型二重円筒衝撃波管の作動特性について作動実験および数値シミュレーション結果より、高圧室圧力を高く保つ時、単純衝撃波管理論に近い衝撃波マッハ数を得ることができること、および、ピストンの下の圧力を下げた方が、ピストンの動きは早く、結果としてピストンの開口時間が短くなることを明らかにした。次に、縦型二重円筒衝撃波管を用いて生成した円筒衝撃波の収縮現象を光学可視化計測し、衝撃波マッハ数 $M_s=1.5$ および 2.0 について安定に収縮する円筒衝撃波を得た。また、擾乱を人為的に加え、種々のモード数に対する円筒衝撃波の収縮・反射の挙動を光学可視化計測し、モード数に依存した非一様さが収縮する円筒衝撃波面背後に現れることを示した。また、複数のモード数が重なり合う場合、最終的に衝撃波の収縮に影響をおよぼすのは、擾乱全体としての初期モード数であることを明らかにした。さらに、モード数が異なる収縮する円筒衝撃波面の歪みの計測を行い、歪みの分布は、計測対象の中でモード数がいちばん小さいモード2の時の歪みが最も大きかった。しかし、歪みの増幅には、モード数の違いによる顕著な差異は認められなかった。

第5章 結 論

衝撃波の収縮について、実験と数値シミュレーションにより定量的解明を行った。得られた知見を、以下に要約する。

- (1) 二次元円弧凹面あるいは断面収縮管路における衝撃波の収縮では、マッハ反射の発生が収縮過程を支配する。
- (2) 内爆型衝撃波の収縮として、円筒衝撃波および球状衝撃波の収縮現象を光学可視化計測し、収縮する衝撃波の挙動とその背後の流れを明らかにした。
- (3) 水平二重円筒衝撃波管を模擬した三次元数値シミュレーションの結果を実験結果と比較し、

定量的な一致を得た。特に、干渉縞分布には、衝撃波の収縮による物理的原因に加えて、二重円筒衝撃波管の内側円筒部の移動・変形に起因する干渉縞の生成が重ね合わされることを明らかにし、その干渉縞発生の機序を明らかにした。

- (4) 収縮する円筒衝撃波面の歪みの変化およびその増幅の様子から衝撃波三重点の生成を示し、衝撃波三重点を生成することで、収縮する円筒衝撃波は非線形な安定状態になることを明らかにした。
- (5) 初期擾乱の発生を極小とするために、縦型二重円筒衝撃波管を製作し、作動特性を明らかにした。また、初期擾乱の影響が極めて小さい円筒衝撃波を得た。
- (6) 種々の収縮モードを持つ円筒衝撃波の収縮では、衝撃面背後にはモード数に依存する非一様性が現れる。また、モード数が、収縮中心での圧力増幅に与える影響は、弱い衝撃波では小さい。

審 査 結 果 の 要 旨

収縮する衝撃波は、その収縮中心近傍に容易に高温・高圧を発生し、さまざまな極限状態を発生する手段として有用である。収縮する衝撃波の研究は、衝撃波工学の重要な研究課題である。しかし、収縮する衝撃波を実験的に発生することは容易ではなく、またその定量的な計測も困難である。従って、収縮する衝撃波の振舞いと収縮中心点での衝撃波面の安定性について、解明すべき問題点を多く残している。

本論文は、収縮する衝撃波の発生・計測の確立とその挙動の解明に関する実験的・数値解析的研究成果を取りまとめたもので、全編5章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、まず、一般的な衝撃波収縮を、管路形状によって平面衝撃波の波面が一点に収束する場合、また円筒ないし球状衝撃波が収縮するいわゆる内爆衝撃波の場合に分類した。実験的には、衝撃波管と二重円筒衝撃波管を用い、収縮する衝撃波をホログラフィー干渉計法で定量的に光学可視化した。また、差分法を用いる数値シミュレーションを実施し、それぞれの場合の衝撃波の挙動を明らかにした。得られた結果は、従来の研究を大系化し、これに新しい解釈を加えたもので、有用な知見である。

第3章では、収縮する円筒衝撃波の収縮中心点近傍での安定性を論じた。実験の二重円筒衝撃波管では、常に初期擾乱による不安定が現れることを示し、実験条件を詳細に考察することにより、これが実験中に現れる装置の微動に起因することを突止め、可視化写真と数値シミュレーション結果との一致を得た。以上のことから、収縮する衝撃波面は収縮と共に線形不安定となり、波面の大変形は非線形の安定に移行することを明らかにした。これは衝撃波工学の重要な知見である。

第4章では、縦型二重円筒衝撃波管を試作し、巧妙な方法で初期擾乱の極小な円筒衝撃波を収縮させている。この円筒衝撃波について、収縮衝撃波の安定に及ぼす初期擾乱の数の効果を明らかにした。これは、今後の衝撃波の安定性に関する研究の指針を与えるものである。

第5章は、結論である。

以上要するに本論文は、収縮する衝撃波の挙動を詳細な実験と数値解析によって定量的に明らかにしたもので、流体工学、衝撃波工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。